

Desarrollo de una herramienta operacional de control de la calidad del agua en zonas portuarias mediante simulación numérica y observaciones

Artículo elaborado por Marcos G. Sotillo y Enrique Álvarez Fanjul (Puertos del Estado); Javier Romo y Xavier Solé (AP Barcelona); Joan Basora (AP Tarragona); Mario Hernández (AP Bilbao); y Manel Grifoll, Gabriel Jordà, Joan Pau Sierra, Manuel Espino y Agustín Sánchez Arcilla (Laboratorio Ingeniería Marítima de la UPC)

El trabajo que se presenta se desarrolló dentro de un Convenio de Colaboración entre Puertos del Estado, las AAPP de Barcelona, Tarragona y Bilbao y el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC (LIM/UPC) y es la base de un futuro sistema de control, previsión y diagnóstico de la calidad del agua en zonas portuarias. El sistema, basado en un conjunto de modelos numéricos de circulación y dispersión actualmente en fase de desarrollo, permitirá analizar y predecir de manera continua la calidad del agua en zonas portuarias y aledañas, siendo de gran utilidad para la evaluación y minimización del impacto que las actividades portuarias puedan tener en el ecosistema circundante. El Sistema Portuario (SP) Español busca la implementación de una gestión de su actividad que permita aunar la mejora de servicios y el incremento de la competitividad con el aumento de la sostenibilidad de la propia actividad. Para alcanzar este objetivo doble, resulta indispensable que el SP adquiera un mayor conocimiento del medio en el que se desarrolla la actividad portuaria, para todo lo cual herramientas y sistemas como el aquí presentado juegan un papel clave.

Actividad portuaria y protección medioambiental: Marco jurídico normativo y necesidad del SP Español de dotarse de un mayor conocimiento del medio

Es necesario que el SP sea capaz de aunar actividad portuaria y protección medioambiental dentro de su práctica operativa habitual. Esta tesis se ve rotundamente reforzada si atendemos al hecho de que el marco jurídico y normativo por el que se viene regulando la actividad portuaria paulatinamente evoluciona hacia posiciones más garantistas en términos de protección ambiental. En este sentido, la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), aprobada por Bruselas, y su transposición a la jurisprudencia española por medio de la Ley 62/2003 y el Real Decreto 907/2007 vienen a “establecer un marco legal para la protección de las aguas superficiales continentales, de transición, costeras y subterráneas, así como para prevenir o reducir su contaminación y promover su uso sostenible”. Por otro lado, la Ley 48/03 y el R.D 253/04 hacen de los Puertos de titularidad Estatal organismos colaboradores con el resto de administraciones competentes en la prevención y control de emergencias por contaminación accidental, incluyéndose hidrocarburos, en la zona de servicios portuarios.

Por todo lo anterior, el SP tiene, ahora más que nunca, la necesidad y la obligación de prestar atención a la gestión y al control de la calidad del agua dentro del ámbito portuario. Ahora bien, para ser capaces de optimizar la actividad portuaria dando una respuesta efectiva a las obligaciones derivadas de toda la normativa en materia de aguas costeras y portuarias anteriormente citada, el SP Español ha de dotarse de un mayor y mejor conocimiento del medio físico portuario. Para alcanzar este objetivo, requisito imprescindible para la explotación avanzada y sostenible de la actividad portuaria, es necesario como paso previo el desarrollo de herramientas y metodologías de control de la calidad ambiental del medio marítimo y atmosférico. Este tipo de herramientas han de ser soportadas por sistemas de observación y previsión portuarios.

Disponer de este mayor conocimiento del medio, unido a un conocimiento adecuado de los potenciales riesgos asociados a la explotación y a las actividades, resulta de gran ayuda para el proceso de toma de decisiones favoreciendo la planificación y optimización de las condiciones de explotación en situación de normalidad operativa. También se utilizará este conocimiento y herramientas para la gestión de riesgos en condiciones de excepcionalidad operativa.

El convenio de colaboración: Objetivos

El objetivo principal de este convenio de colaboración es generar un sistema integrado de modelos numéricos y de observaciones para la simulación y control de la calidad del agua en zonas portuarias, así como su posterior implementación operacional en las AAPP firmantes del convenio. La finalidad de este sistema integrado es la de permitir conocer y predecir la hidrodinámica del Puerto de forma operacional y ser capaz de simular la renovación y calidad del agua en función de la geometría del puerto y de las condiciones océano-meteorológicas existentes en cada momento. Así se conseguirá una gestión eficiente del riesgo asociado a eventos contaminantes producidos por accidentes potenciales y reales.

De manera más específica, los objetivos que se pretenden cumplir con este convenio de colaboración son:

- Avanzar hacia la predicción operativa de la hidrodinámica de las aguas interiores del puerto por medio de la generación de herramientas de modelado acopladas tanto a los Sistemas de Previsión Oceanográfica de Puertos del Estado como a los desarrollados dentro del Proyecto ESEOO. El Sistema de Modelado Portuario propuesto permitirá diagnosticar y predecir la dinámica de intercambios de agua y tiempos de renovación en las zonas portuarias de las AAPP firmantes.
- Establecer cuantitativamente un catálogo de situaciones meteo-oceanográficas y supuestos posibles de contaminación para cada una de las AAPP firmantes del convenio.
- Realizar un Atlas metodológico de respuesta a supuestos de contaminación del catálogo bajo situaciones meteo-oceanográficas determinadas. Este producto será de utilidad para la toma de decisiones en relación con la gestión del riesgo ambiental del puerto y el desarrollo de los planes de contingencia correspondientes.

Información oceanográfica existente: ¿Dispone el SP Español de información oceanográfica adecuada para la monitorización y predicción de la hidrodinámica portuaria?

En el ámbito portuario, el uso de información de ciertas variables, tales como el oleaje y el nivel de mar, es

común en la gestión de las actividades correspondientes. Por todo ello, el Área de Medio Físico de Puertos del Estado ha venido desarrollando y manteniendo durante más de dos décadas servicios operacionales de predicción oceanográfica de estas variables, que junto con la información obtenida a partir de las redes de medida continuas de Puertos del Estado, permiten proporcionar al SP Español de un conocimiento suficiente de estas variables con marcada influencia sobre la actividad portuaria (<http://www.puertos.es>). Sin embargo, la implementación de sistemas análogos a los referidos para el pronóstico de las corrientes está considerablemente menos extendido.

De hecho, el accidente del *Prestige* y la subsiguiente crisis sirvió para identificar la falta de un sistema operacional capaz de monitorizar y predecir corrientes como una de las carencias principales de la Oceanografía Operacional Española. Con el fin de subsanar éstas, se aprobó el Proyecto ESEOO (*Establecimiento de un Sistema Español de Oceanografía Operacional*), coordinado por Puertos del Estado y con una participación de 14 grupos e instituciones Españolas junto con 5 foráneas, lo que permitió crear nuevos servicios oceanográficos operacionales.

Entre los objetivos del Proyecto ESEOO destacaba como prioritario el desarrollo de un servicio de predicción oceanográfico basado en modelado numérico capaz de proporcionar predicciones diarias de corrientes y otras variables oceanográficas a corto plazo (72 horas). Como resultado del esfuerzo realizado, el Sistema de Predicción Oceanográfico ESEOO es a día de hoy una realidad, y proporciona por medio de sus tres componentes regionales (ESE-OAT, ESEOMED y ESEOCAN) una predicción oceanográfica operacional regional sobre las aguas españolas Atlánticas, Mediterráneas y del Archipiélago Canario. Puertos del Estado, en colaboración con IMEDEA y la Agencia Española de Meteorología (AEMET), se encarga de asegurar el servicio operacional del Sistema de Predicción Oceanográfica ESEOO realizando la integración diaria de las diferentes aplicaciones regionales. Una actualización diaria de distintos productos obtenidos a partir de las predicciones es hecha pública a través de la página web ESEOO (<http://www.esooo.org>).

La existencia de este sistema de predicción supone un salto cualitativo en cuanto a la caracterización dinámica de nuestras aguas. Con relación a los temas medioambientales hay que destacar que Salvamento Marítimo tiene acceso a las predicciones de corrientes del Sistema ESEOO y cuenta con ellas en sus protocolos de actuación para la lucha contra la contaminación en el mar. Las predicciones ESEOO de corrientes, a parte de ser en si mismas una información necesaria para los responsables de la gestión de la crisis que les permite conocer el estado del medio en el que se des-

arrolla la crisis, se han mostrado como una información necesaria para ser usadas como forzamiento de los modelos de vertidos que se emplean para monitorizar y predecir la trayectoria de los derrames. En varios ejercicios de simulacro en los que Salvamento Marítimo ha simulado escenarios de crisis se ha verificado que el empleo de estas predicciones ESEOO como forzamiento de los modelos de vertido aumenta la efectividad de las tareas de recogida de hidrocarburo en alta mar, reduciendo el área de búsqueda de las manchas.

Pese a contar con la valiosa información del servicio operacional de corrientes ESEOO, a día de hoy la respuesta a la pregunta que da título a este epígrafe es negativa. La resolución espacial de las predicciones ESEOO (actualmente, del orden de 4 Km), suficiente para caracterizar procesos en aguas abiertas, limita la utilidad y eficacia de estas predicciones para reproducir la dinámica costera y portuaria con el suficiente grado de detalle requerido para su utilidad a los propósitos portuarios.

Ahora bien, el disponer de esta información regional ESEOO nos permite desarrollar sistemas de modelado local centrado en los puertos que tomando esta información regional de baja resolución como punto de partida permitan producir la información de las condiciones hidrodinámicas a escala portuaria. Esta línea es la que se está siguiendo en este convenio, en el cual se está desarrollando una aplicación de modelado portuario, anidada en ESEOO, que permita contar con una monitorización y predicción diaria de la condiciones hidrodinámicas existentes en las AAPP firmantes.

Sistema de Modelado propuesto para la monitorización y predicción de la dinámica portuaria

Con el fin de ser capaces de pasar de la escala regional de ESEOO (~ 4Km) a la escala local (~ 30m) requerida para producir información hidrodinámica útil para la actividad portuaria se plantea la creación de una herramienta de modelado, que partiendo de las predicciones ESEOO, alcance a simular la dinámica en zonas portuarias. Para ello se plantea un sistema basado en 3 aplicaciones anidadas, las cuales van desde la de resolución más baja llamada Aplicación “de Plataforma” (resolución espacial de 1Km) a la de mayor resolución centrada en las zonas interiores del puerto elegido (Aplicación “Portuaria”, resolución espacial de 30 m), pasando por una Aplicación “Costera” intermedia que cubre las aguas adyacentes mas cercanas al puerto (resolución espacial en torno a 200 m).

Para dar cobertura a los dos puertos Mediterráneos, Barcelona y Tarragona, sobre los que se está trabajando en el Convenio se está desarrollando un sistema que usa una única Aplicación de Plataforma, la cual emplea como forzamiento las predicciones de la componente Mediterránea del sistema ESEOO (ESEOMED) y las predicciones atmosféricas de alta resolución proporcionadas por AEMET, que cubre todo el litoral Catalán. Ya en el segundo nivel del anidamiento, nos centramos en cada uno de los puertos referidos, para los que se ha implementado aplicaciones costeras las cuales proporcionan predicciones con una

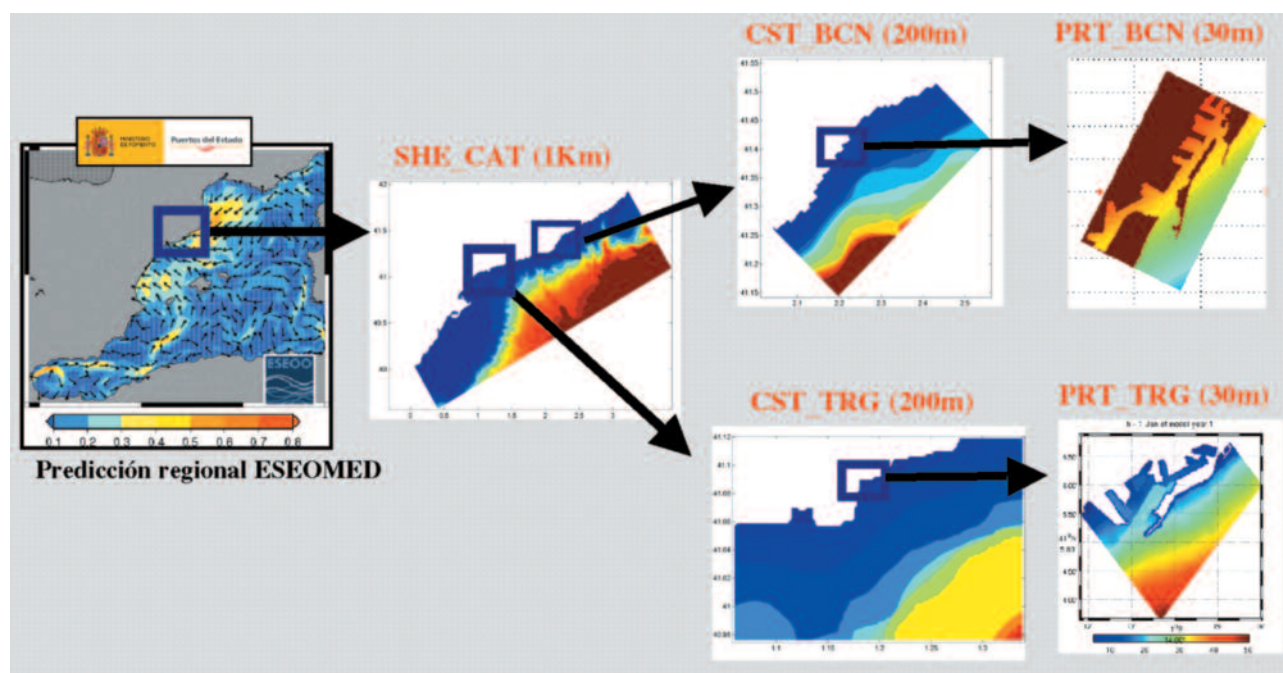


Figura 1. Esquema de la aplicación de modelado Mediterránea diseñada para la consecución de predicción local en las AAPP de Barcelona y Tarragona. Partiendo de la información proporcionada por las predicciones regionales ESEOO (cobertura aplicación ESEOMED: Mediterráneo occidental) se ha desarrollado una Aplicación de Plataforma (SHE-CAT, da cobertura a todo el litoral catalán) que permite proporcionar condiciones iniciales y de contorno a las aplicaciones costeras (CST-BCN y CST-TRG), las cuales sirven a su vez para forzar aplicaciones portuarias de más alta resolución (PRT-BCN y PRT-TRG).

resolución de 200 m para las zonas adyacentes a los Puertos. Estas aplicaciones parten, no ya de la información ESEOO de 4 km, sino de la información de resolución 1 km producida por la Aplicación de Plataforma anteriormente referida. Al tiempo, estas aplicaciones costeras proporcionan la información necesaria para ejecutar las aplicaciones portuarias de alta resolución (resolución espacial de 30 m). La Figura 1 muestra el esquema de anidamiento del sistema propuesto y los dominios geográficos de cada una de las aplicaciones numéricas usadas para producir la información en el entorno portuario.

Para simular las condiciones hidrodinámicas de cada dominio se han empleado modelos baroclínicos tridimensionales. En el caso de la aplicación de plataforma y en las dos aplicaciones costeras se ha empleado una versión adaptada a la costa española del modelo SYMPHONIE, mientras que para las aplicaciones portuarias se está utilizando una versión, también particularizada, del modelo ROMS.

Para llevar a cabo la aplicación correspondiente al Puerto de Bilbao, se aplicará un esquema análogo al de la Aplicación Mediterránea, con la salvedad de que no será necesario implementar el primer nivel de anidado, esto es la aplicación de plataforma, ya que se pretende aprovechar la existencia de un servicio de predicción desarrollado por AZTI dentro del propio Proyecto ESEOO, que consta de una aplicación de modelado con resolución de 1km anidada a la predicción regional de ESEOO proporcionada por su componente

Atlántica (ESEOAT). El anidarnos a esta aplicación de plataforma ya existente dentro de un marco de colaboración evita la duplicidad de sistemas y el consiguiente gasto innecesario de recursos. La Figura 2 muestra el esquema de anidamiento del sistema propuesto y los dominios geográficos de cada una de las aplicaciones numéricas necesitadas en el proceso de anidamiento para producir la información en el Puerto de Bilbao.

El desarrollo de estas herramientas de modelización se verá completado con la validación de las mismas. Para ello se utilizará la mayor cantidad de fuentes de información observacional existente, al tiempo que se realizarán una serie de campañas específicas centradas en los puertos involucrados con el objetivo de completar la caracterización de la dinámica portuaria y evaluar la actuación de los sistemas de modelado en las citadas AAPP.

Aplicaciones potenciales del sistema de predicción hidrodinámica portuaria propuesto

Entre los múltiples ejemplos de aplicación de la información proporcionada merece la pena destacar que:

- El sistema permite analizar y predecir corrientes en el entorno portuario con la consiguiente aplicación directa de ayuda a la navegabilidad en zonas portuarias. La Figura 3 muestra un ejemplo del tipo de la información espacial del campo de corrientes superficiales que el sistema puede producir con una frecuencia horaria y un horizonte de predicción máximo de 72 horas.

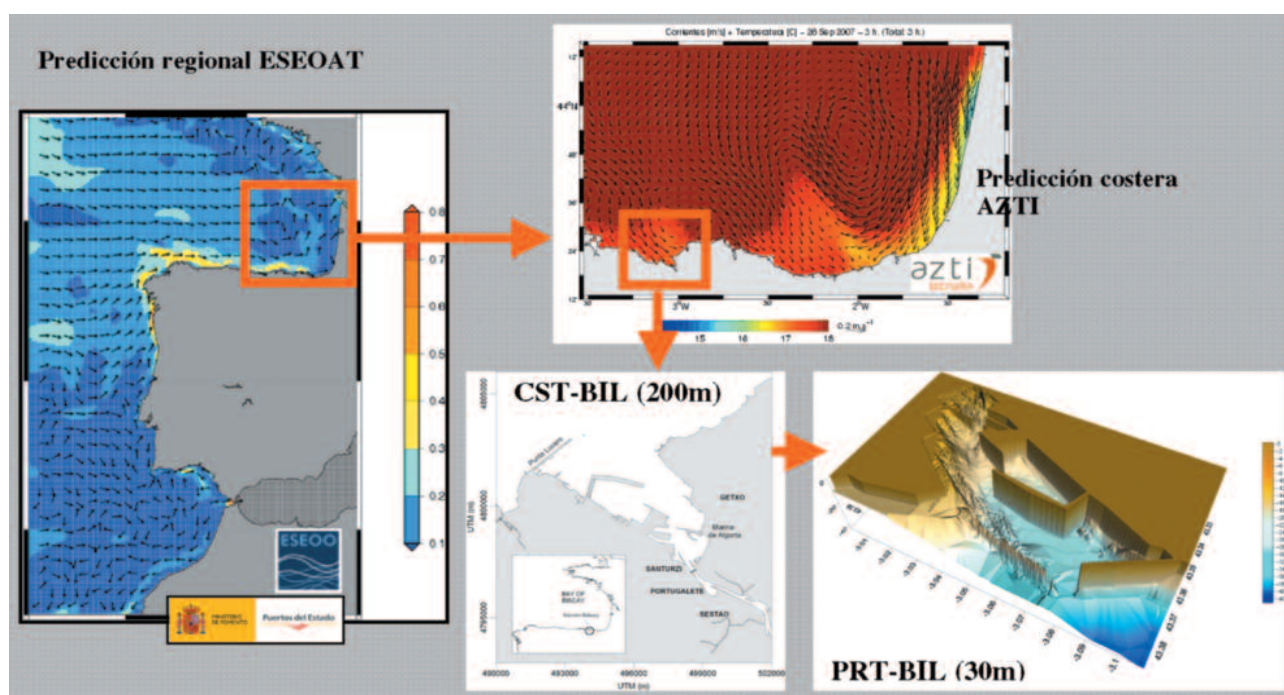


Figura 2. Esquema de la aplicación de modelado diseñada para la consecución de predicción local en la AP de Bilbao. La existencia de los sistemas de predicción ESEOO en la escala regional (ESEOAT) y la aplicación de resolución de 1Km de AZTI, permite que para el caso del Puerto de Bilbao sólo sea necesario configurar una aplicación costera de alta resolución (CST-BIL) a la que se anide la portuaria (PRT-BIL).

- Asimismo, el conocimiento de las condiciones hidrodinámicas permite la evaluación de las condiciones dispersivas de las aguas portuarias, pudiendo calcularse los distintos tiempos de renovación de agua existentes en cada una de las zonas del puerto. Para ello, a partir de las predicciones se aplicará un modelo numérico que permita calcular los tiempos de renovación de las aguas en las distintas zonas portuarias (Figura 4). Esta herramienta será implementada de forma operacional, de tal forma que se pueda acceder diariamente tanto a la información de corrientes como a los tiempos de renovación del agua. Disponer de predicciones a tres días permite, no sólo contar con la información necesaria para responder a una situación de emergencia fruto de la actividad operativa, sino llevar a cabo la planificación de operaciones sensibles desde el punto de vista medioambiental (p.eg. dragados) o de explotación (p.eg. acciones de remolcado) en función de las condiciones océano-meteorológicas previstas.
- El conocimiento de la hidrodinámica portuaria que ofrece el sistema de modelado propuesto por medio de los productos anteriormente referidos es el instrumento necesario para la construcción de mapas de riesgos. El disponer de la información relativa a la tasa de renovación de las aguas junto con el conocimiento de las distintas fuentes potenciales de contaminación, puntuales y difusas, relacionadas con la actividad portuaria y de las distintas concesiones permite evaluar el riesgo. La Figura 5 muestra un ejemplo (para el Puerto de Barcelona) de la distribución espacial del riesgo, atendiendo a las condiciones meteo-oceanográficas existentes (mostradas en la Figura 4) y a las actividades potencialmente contaminantes censadas. Es impor-

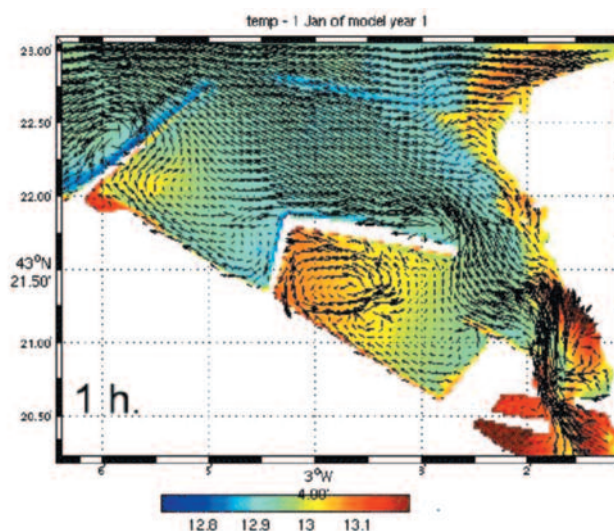


Figura 3. Ejemplo de la distribución espacial del campo de corriente superficial modelado para el Puerto de Bilbao.

tante remarcar que al disponer de información de predicción a tres días se puede evaluar la evolución temporal del riesgo con el consiguiente avance en la gestión del mismo y la gran ayuda que esto representa para la toma de decisiones.

- La operacionalidad continua del sistema asegura una producción de información en modo diario que con el tiempo permite disponer de información suficiente para completar estadísticas, climatologías y atlas. Estos productos estadísticos aseguran disponer de un conocimiento más detallado del medio portuario, permitiendo la opción de elaborar un catalogo de situaciones meteo-oceanográficas con su frecuencia relativa de ocurrencia, lo cual es

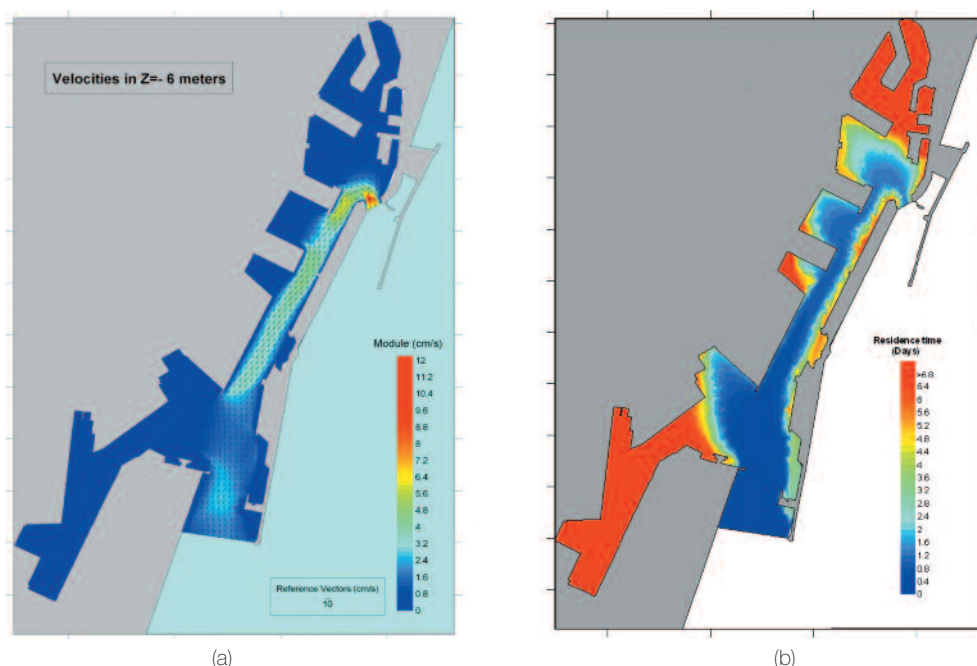


Figura 4. Ejemplo de la distribución espacial del campo de corriente superficial modelado (a) y del patrón espacial exhibido por los tiempos de residencia, calculados a partir de dicho campo de corrientes, (b) para el Puerto de Barcelona.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA OPERATIVA EN ZONAS PORTUARIAS MEDIANTE SIMULACIONES

El trabajo se desarrolla dentro de un Convenio de Colaboración entre Puertos del Estado, las AAPP de Barcelona, Tarragona y Girona para el desarrollo de un futuro sistema de control, previsión y diagnóstico de la calidad del agua en zonas portuarias. El sistema, basado en un conjunto de modelos matemáticos, permitirá analizar y predecir de manera continua la calidad del agua en zonas portuarias y aledañas, siendo de gran utilidad para la gestión del riesgo ambiental del ecosistema circundante.

La finalidad de este sistema integrado es la de permitir conocer y predecir la hidrodinámica del Puerto de forma operacional y de las condiciones océano-meteorológicas existentes en cada momento. Así se conseguirá una gestión eficiente del riesgo ambiental del puerto y de las condiciones océano-meteorológicas existentes en cada momento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A

AVANZAR HACIA LA PREDICCIÓN OPERATIVA DE LA HIDRODINÁMICA en las aguas interiores del puerto

B

Establecer cuantitativamente un **CATÁLOGO DE SITUACIONES** meteo-oceanográficas y supuestos posibles de contaminación para cada una de las AAPP firmantes del convenio.

C

Realizar un **ATLAS METODOLÓGICO** de respuesta a supuestos de contaminación del catálogo bajo situaciones meteo-oceanográficas determinadas. Este producto será de utilidad para la toma de decisiones en relación con la gestión del riesgo ambiental del puerto y el desarrollo de los planes de contingencia correspondientes.

APLICACIONES

1

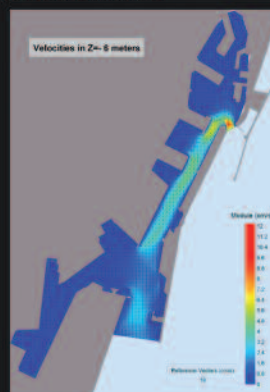
AYUDAS A LA NAVEGACIÓN

El sistema permite analizar y predecir corrientes en el entorno portuario con la consiguiente aplicación directa de ayuda a la navegación en zonas portuarias.

(Puerto de Bilbao)

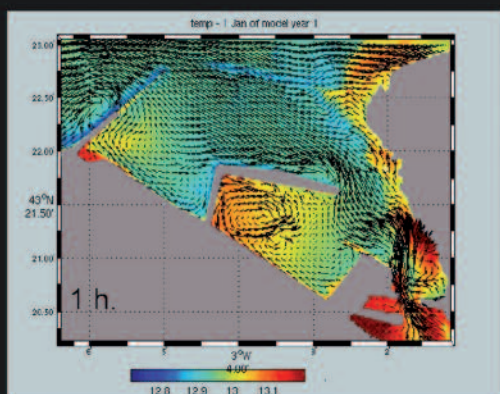
2

TIEMPOS DE RENOVACIÓN DE LAS AGUAS PORTUARIAS



El conocimiento de las condiciones hidrodinámicas permite la evaluación de las condiciones dispersivas de las aguas portuarias, pudiendo calcularse los distintos tiempos de renovación de agua existentes en cada una de las zonas del puerto en función de las condiciones océano-meteorológicas actuales y previstas.

(Puerto de Barcelona)

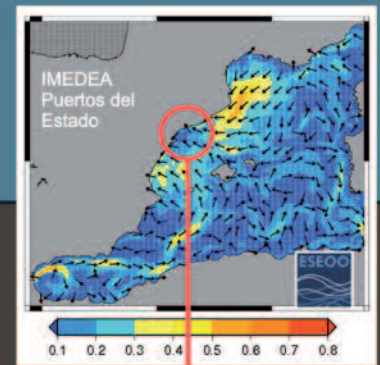


ACIONAL DE CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA ULACIÓN NUMÉRICA Y OBSERVACIONES

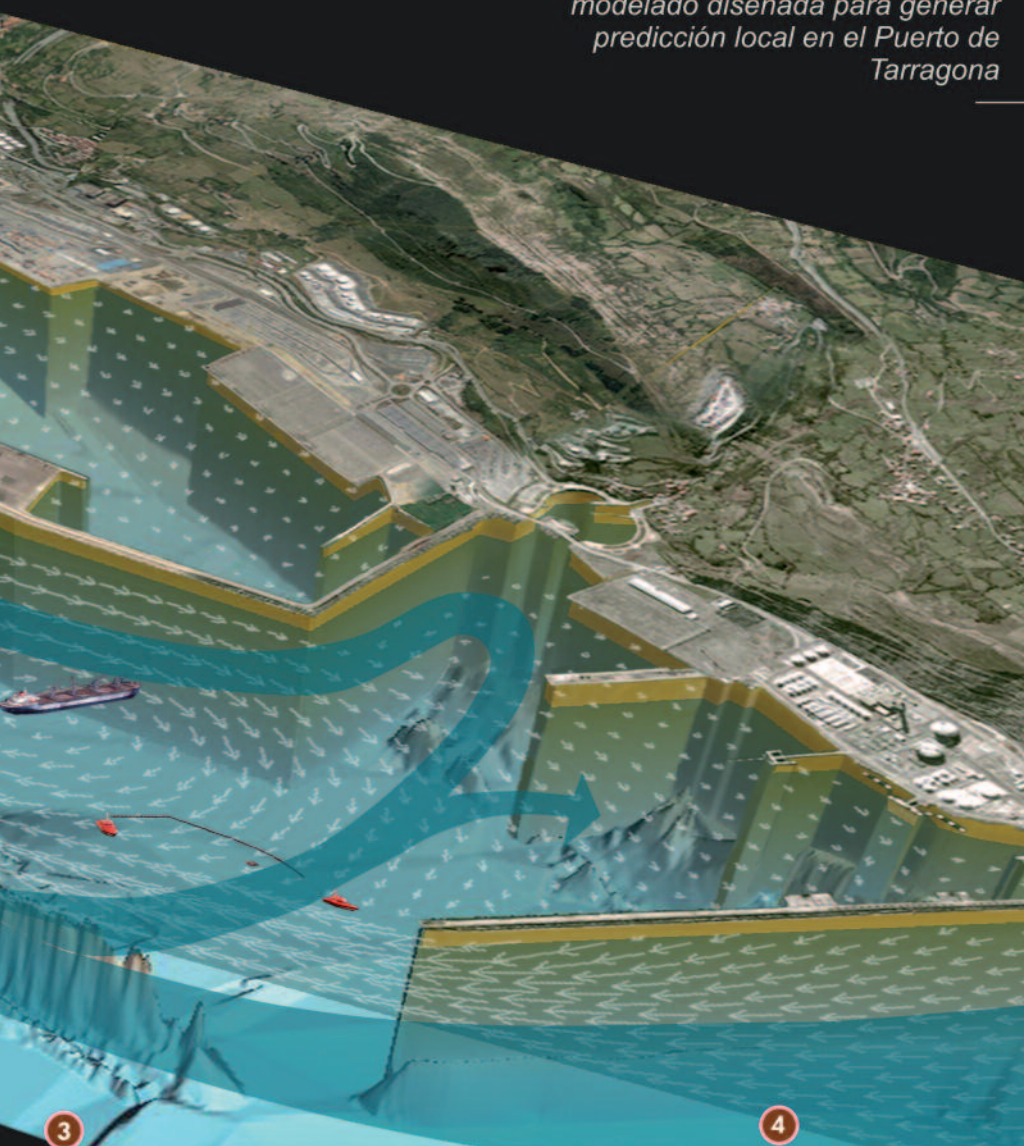
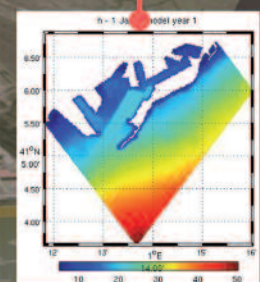
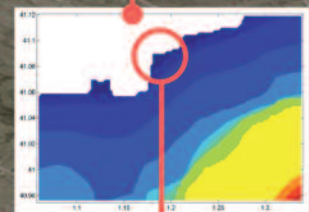
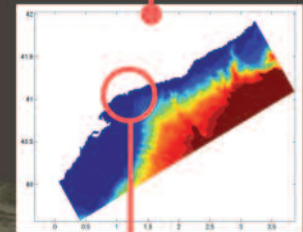
y Bilbao y el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC (LIM/UPC) y es la base de un
de modelos numéricos de circulación y dispersión actualmente en fase de desarrollo,
a evaluación y minimización del impacto que las actividades portuarias puedan tener en

y ser capaz de simular la renovación y calidad del agua en función de la geometría del
asociado a eventos contaminantes producidos por accidentes potenciales y reales.

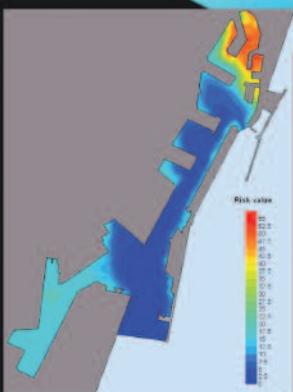
*Esquema de la aplicación de
modelado diseñada para generar
predicción local en el Puerto de
Tarragona*



ESEMED (4 km)
Predicción mediterránea



3 EVALUACIÓN DEL RIESGO



Disponer de la información relativa a la tasa de renovación de las aguas portuarias junto con el conocimiento de las distintas fuentes potenciales de contaminación puntuales y difusas, permite evaluar el riesgo y construir mapas de su distribución espacial.

(Puerto de Barcelona)

4 PRODUCCIÓN DE INFORMACIÓN EN MODO DIARIO

El sistema asegura una actualización diaria de la información que con el tiempo permite disponer de información suficiente para completar estadísticas, climatologías y atlas de las aguas portuarias.

5 GENERACIÓN DE ESCENARIOS ÚTILES EN EL DISEÑO DE PLANES DE CONTINGENCIA

Esta herramienta de modelado será la base para generar escenarios que permitan elaborar planes de contingencia para nuevos potenciales eventos contaminantes o bien mejorar los ya existentes. Asimismo, puede ser de utilidad para analizar la hidrodinámica portuaria bajo diferentes escenarios de cambio climático.

de indudable utilidad para facilitar la planificación y gestión ambiental del puerto.

- Por último, cabe destacar que estas herramientas de modelado serán la base para generar escenarios que permitan elaborar planes de contingencia para nuevos potenciales eventos contaminantes o bien mejorar los ya existentes. Asimismo, servirán para analizar la hidrodinámica portuaria bajo diferentes escenarios climáticos, caso de ser necesario.

Conclusiones y estado actual de las tareas del convenio

En el marco del Convenio de colaboración establecido entre Puertos del Estado, las AAPP de Barcelona, Tarragona y Bilbao y el LIM/UPC para el *Desarrollo de un programa de control de la calidad del agua en zonas portuarias mediante simulación numérica y observaciones* se está generando una herramienta operacional de monitorización y predicción continua de condiciones hidrodinámicas e intercambios de masas de agua para zonas portuarias y adyacentes. Los resultados obtenidos tienen múltiples implicaciones con relación al análisis de la calidad del agua, la gestión de riesgos, la respuesta a eventos contaminantes y en general con la planificación y gestión optimizada de las actividades relacionadas con la explotación portuaria y su sostenibilidad.

La información producida con los sistemas de modelado generados dentro de este Convenio puede ser de

gran utilidad para dar soporte a los desarrollos metodológicos propugnados en el marco de la ROM5.1, y más en particular por sus programas relativos a la Delimitación de Usos y Tipificación de las Masas de Agua, Evaluación y Gestión de Riesgos Ambientales, Vigilancia Ambiental y Gestión de Episodios Contaminantes. Al tiempo, estos sistemas de modelado representan una herramienta potente de conocimiento del medio físico portuario, la cual permitirá al SP Español mejorar su gestión relativa a las implicaciones medioambientales derivadas de los cambios en el marco jurídico y normativo asociadas a la aplicación de la Directiva Marco del Agua. Análogas consideraciones se pueden hacer para la Directiva de Riesgos.

Las tareas se encuentran en un estado avanzado, habiéndose ya completado la primera versión operacional del sistema Mediterráneo. El LIM y Puertos del Estado están actualmente finalizando los trabajos relativos al último ajuste de los modelos numéricos y su aplicación operacional. Una vez completada esta aplicación operacional Mediterránea, con sus tres niveles de anidado hidrodinámico más la herramienta para el cálculo de la renovación para los Puertos de Barcelona y Tarragona, se procederá a implementar la correspondiente al Puerto de Bilbao. El objetivo a más largo plazo consiste en aprovechar las sinergias generadas en el marco del convenio con vistas a conseguir una herramienta de modelado exportable que permita, aprovechando la experiencia adquirida en estas experiencias piloto, desarrollar aplicaciones similares en el resto de los puertos del SP Español.

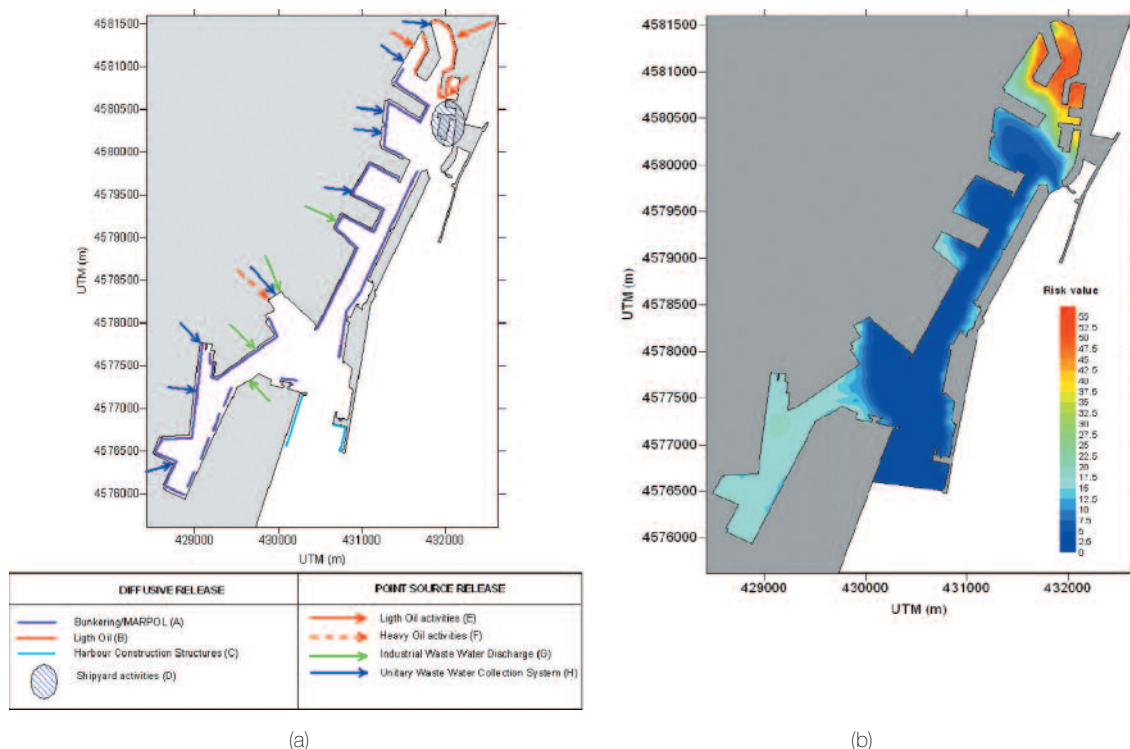


Figura 5. (a) Distribución espacial de las diferentes fuentes, puntuales y difusas, de contaminación potencial identificadas para el Puerto de Barcelona y (b) índice de riesgo para el Puerto de Barcelona evaluado a partir de la información censada de los potenciales contaminantes junto con el patrón de circulación y las tasas de renovación detalladas en la Figura 4.